

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1973 г.

537.312.62

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ \*)

*И. Гиавер*

В моем лабораторном журнале имеется следующая запись от 2 мая 1960 г.: «В пятницу, 22 апреля, я выполнил очередной эксперимент по измерению энергетической щели в сверхпроводнике». Это было явно выдающееся событие — не только потому, что я редко делаю записи в моем журнале, но и потому, что успех этого эксперимента явился той причиной, по которой я имею честь и удовольствие выступать сегодня перед вами. В этой лекции я постараюсь, в меру своих способностей, восстановить события и мысли, которые привели к этой записи, хотя трудно описывать то, что представляется мне теперь чисто случайным. Я надеюсь, что эти личные и субъективные воспоминания будут для вас интереснее, чем чисто техническая лекция, в особенности потому, что в настоящее время имеется множество хороших обзорных статей по туннельным эффектам в сверхпроводниках<sup>1</sup>.

В одной из газет Осло я обнаружил недавно следующий заголовок: «Мастер по биллиарду и бриджу, едва не провалившийся на экзамене по физике, получает Нобелевскую премию». Речь шла о моих студенческих днях в Тронхейме. Должен сознаться, что это сообщение не лишено оснований, поэтому я не только не буду пытаться делать вид, что этого не было, но признаюсь также, что я чуть не провалился и на математике. В те дни меня не очень интересовали инженерное дело и учеба вообще, однако в 1952 г., правда без блеска, но я все же ухитрился окончить университет. По некоторым причинам, главным образом из-за нехватки жилья в Норвегии в то время, мы с женой решили эмигрировать в Канаду, где я вскоре поступил на работу в Канадскую «Дженерал электрик». Мне предложили пройти трехгодичный курс инженерного дела и прикладной математики, известный как «курс азбуки». На этот раз я понял, что к делу надо относиться серьезно, и поскольку это, возможно, был мой последний шанс, я действительно усердно учился в течение нескольких лет.

Когда мне исполнилось 28 лет, я оказался в Скенектеди, штат Нью-Йорк, где обнаружил, что люди, занимаясь физикой, могут неплохо зарабатывать на жизнь. Я работал тогда над различными заданиями компаний по прикладной математике, и постепенно у меня родилось ощущение, что сама эта математика гораздо более продвинутая наука, чем действительное знание тех физических систем, к которым мы ее прилагаем.

\*) Ivar Giavert, Electron Tunneling and Superconductivity, Science 183, 1253 (1974). Перевод Г. Ф. Жаркова.

Я стал думать, что мне, может быть, следует изучить физику, и, хотя я оставался по-прежнему инженером, мне была предоставлена соответствующая возможность в Исследовательской лаборатории «Дженерал электрик».

По заданию я должен был работать с тонкими пленками, мне же до сих пор приходилось иметь дело лишь с фотопленками. Однако мне повезло

в том отношении, что по работе я был связан с Джоном Фишером, который был знаком с другими вещами. Фишер начинал тоже как инженер, однако позднее заинтересовался теоретической физикой. Он считал, что используя технику тонких пленок, можно сделать полезные электронные устройства, и вскоре я уже работал с тонкими металлическими пленками, разделенными тонкими изолирующими слоями, пытаясь осуществить туннельные эксперименты.

У меня нет сомнения в том, что Фишер знал о туннельных экспериментах Лео Эсаки; но я в то время определенно о них не знал. Как раз тогда я только-только одолевал квантовую механику в Ренселлеровском политехническом институте (РПИ) в г. Трой, штат Нью-Йорк, где слушал официальный курс физики. Поэтому представление о том, что частица может проходить через барьер, казалось мне чем-то удивительным. Для инженера весьма странно звучит утверждение, что если вы будете бросать теннисный мяч в стену достаточное число раз, то он в конце концов пройдет сквозь стену, не разрушив ее и не разрушившись сам. Да, трудный путь лежит к Нобелевской премии! «Фокус», конечно, состоит в том, чтобы использовать очень маленькие мячи и взять много их. Так, если два куска металла поместить очень близко друг к другу, но чтобы они не соприкасались, то электроны в металлах можно рассматривать как мячи, а пространство между металлами — как стену. Соответствующая ситуация пояснена на рис. 1.

Хотя классическая механика правильно

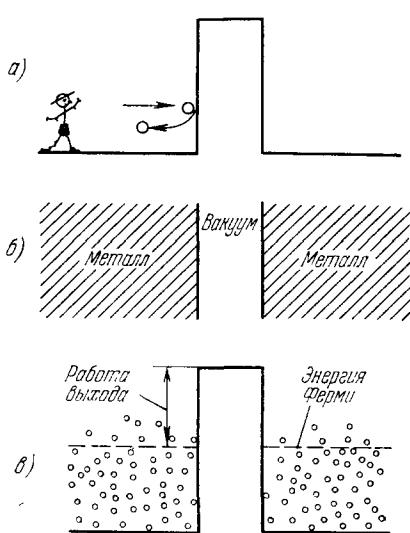


Рис. 1. а) Если человек бросает мяч в стенку, мяч отскакивает назад. В соответствии с законами физики мяч может пройти (туннелировать) сквозь стенку, однако вероятность этого пренебрежимо мала, поскольку мяч является макроскопическим объектом. б) Два металла, разделенные пустотой, представляют собой ситуацию, аналогичную рис. а). Электроны в металле — это «мячи», а пустой промежуток соответствует стенке. в) Изображена энергетическая диаграмма двух металлов. Электроны не обладают достаточной энергией и не в состоянии перейти в вакуум. Однако металлы могут обмениваться электронами путем туннелирования. Если металлы находятся достаточно близко друг к другу, вероятность туннелирования велика, поскольку электрон представляет собой микроскопическую частицу.

предсказывает поведение больших объектов, таких, как теннисные мячи, однако для того чтобы предсказать поведение малых объектов, таких, как электроны, мы должны использовать квантовую механику. Наша физическая интуиция основана на каждодневном жизненном опыте, где мы имеем дело с большими объектами, поэтому мы не должны слишком удивляться, что электроны иногда ведут себя удивительным и неожиданным образом.

Ни Фишер, ни я не имели достаточной подготовки в области экспериментальной физики, точнее говоря, ее вообще у нас не было, и наши пер-

вые эксперименты окончились неудачей. Чтобы туннельный ток можно было заметить и измерить, разделяющий металлы промежуток не должен превышать 100 Å. Поэтому с самого начала мы решили попытаться не использовать в качестве промежутка между металлами воздух или вакуум, ввиду проблем, связанных с вибрациями. В конце концов мы оба понимали кое-что в технике! Вместо этого мы попытались прокладывать между металлами разнообразные тонкие изоляторы, сделанные из ленгмюровских пленок и из формвара. Однако в таких пленках неизбежно имеются маленькие дырочки, а поскольку один из электродов, которые мы использовали в наших контактах, был ртутным, то он обычно закорачивал пленки. Так мы потратили некоторое время, измеряя интересные, но всегда невоспроизводимые вольт-амперные характеристики, к каждой из которых мы относились, как к чуду, поскольку каждая наблюдалась лишь однажды. Через несколько месяцев мы напали на правильную идею: использовать напыленные металлические пленки и разделить их естественно образующимся слоем окислов.

Чтобы осуществить наши идеи, нам нужна была установка для напыления; так я приобрел свое первое экспериментальное оборудование. Ожидая, пока прибудет напылитель, я сильно беспокоился — я опасался погрызнутуть в экспериментальной физике, будучи привязан к этой дорогостоящей машине. Мои тогдашние планы состояли в том, чтобы переключиться на теоретическую физику, как только я приобрету достаточно знаний. Предчувствие меня не обмануло: я действительно привязался к напылителю, не потому, что тот дорого стоил, а потому, что он совершенно очаровал меня. Схема его работы была очень проста и пояснена на рис. 2. Чтобы приготовить туннельный контакт, мы сперва напыляли в вакууме алюминий на стеклянную пластинку. Затем эту пленку выносили на воздух и нагревали, в результате чего ее поверхность быстро окислялась. После этого на первоначальную пленку напылялись несколько поперечных полосок алюминия, благодаря чему одновременно получалось несколько контактов. Последовательность операций пояснена на рис. 3. Этот процесс решал сразу две проблемы: во-первых, в окисле не было дырочек, так как он «самозалечивался», и во-вторых, мы избежали механических проблем, возникавших при работе с ртутным электродом. К апрелю 1959 г. мы выполнили несколько успешных туннельных экспериментов. Вольт-амперные характеристики наших образцов были в приемлемой степени воспроизводимы и хорошо согласовались с теорией. Типичные результаты этих экспериментов изображены на рис. 4. Для контроля мы варьировали площадь пленок и толщину окисла в контакте, меняли температуру. Все выглядело превосходно, и я даже выступил на лабораторном семинаре. К этому времени я уже прорешал уравнение Шредингера достаточное число раз, чтобы поверить в то, что электроны иногда ведут себя как волны, и больше особо не беспокоился по этому поводу.

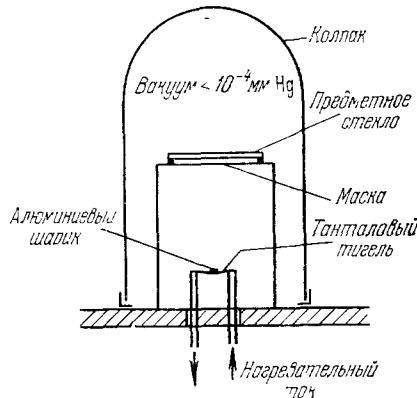


Рис. 2. Схематический чертеж вакуумной системы для нанесения металлических пленок.

Если, например, нагревать током алюминий, помещенный в танталовый тигель, то сперва алюминий плавится, затем кипит и испаряется. Алюминиевые пары осаждаются и затвердевают на любой холодной подложке, помещенной на пути паров. Наиболее распространены подложки, изготовленные из обычных предметных стекол для микроскопа. Экранируя эти стекла металлическими масками с прорезями, можно получать пленки различной конфигурации.

Однако в лаборатории было много настоящих физиков, которые отнеслись к моему эксперименту с пристрастием. Откуда я знаю, что у меня нет металлических закороток? Может быть, это ионные токи? Или вовсе не туннелирование, а полупроводимость? Конечно, я не мог ответить на эти вопросы, и, хотя теория и эксперимент находились в хорошем согласии, сомнения в правильности полученных результатов не давали

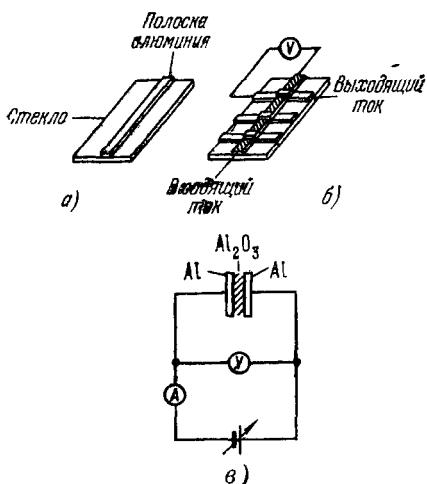


Рис. 3. а) Предметное стекло для микроскопа с нанесенной посередине полоской алюминия. Под воздействием воздуха на поверхности пленки алюминия образуется защитный слой окисла. Толщина окисла зависит от ряда факторов, таких, как время экспонирования, температура, влажность. б) После образования нужного слоя окисла на первую пленку напыляются поперечные полоски алюминия, образуя «сэндвичи» с окислом, зажатым между металлическими пленками. Ток пропускается вдоль одной из алюминиевых пленок, проходит через слой окисла и далее идет по другой пленке, в то время как на слое окисла регистрируется падение напряжения. в) Схематическое изображение контура. Мы измеряли вольт-амперные характеристики туннельного перехода емкостного типа, образуемого двумя пленками и окислом. Когда толщина окисла была меньше примерно 50 Å, через слой окисла протекал заметный постоянный ток.

мне покоя. Я потратил немало времени, изобретая немыслимые схемы, вроде туннельного триода или холодного катода, как для того, чтобы попытаться окончательно доказать, что я имею дело с туннелированием, так и для того, чтобы сделать мою работу полезной. В то время мне казалось странным получать зарплату, занимаясь тем, что я считал просто забавой, и моя совесть была неспокойна. Но, как и в случае квантовой механики, вы постепенно привыкаете, так что я теперь часто отстаиваю противоположную точку зрения: мы не должны жалеть денег на то, чтобы люди занимались чистыми исследованиями.

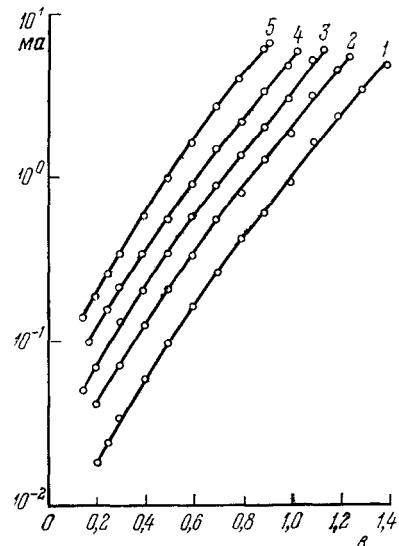


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики пяти различных туннельных переходов одинаковой толщины, но различной площади.

Ток пропорционален площади перехода. Это обстоятельство явилось одним из первых указаний, что мы имеем дело с туннелированием, а не с закоротками. В самых первых экспериментах мы использовали относительно толстые слои окисла, так что при малых напряжениях через них проходил очень слабый ток.

Я продолжал «испытывать» свои идеи на Джоне Фишере, который со свойственными ему оптимизмом и энтузиазмом занимался теперь проблемами фундаментальных частиц. Кроме того, я получал все больше консультаций и руководящих указаний от Чарлза Бина и Уолтера Харрисона, двух физиков, обладавших сверхъестественной способностью делать ясной любую вещь, если только под рукой были доска и кусок мела. Я продолжал слушать официальный курс в РПИ, и однажды в курсе физики твердого тела, который читал профессор Хантингтон, мы дошли до сверхпроводимости. Ясное дело, я не поверил, что сопротивление падает в точности до нуля, но что действительно привлекло мое внимание, так это упоминание об энергетической щели в сверхпроводнике. Эта щель была одним из центральных пунктов новой теории Бардина — Купера — Шриффера (БКШ). Если эта теория была сколько-нибудь правильной и если мои туннельные эксперименты были сколько-нибудь надежными, тогда для меня было очевидно, что если их скомбинировать, то должны произойти некоторые весьма интересные вещи (рис. 5).

Когда я вернулся в лабораторию «Дженерал электрик», то испробовал эту простую идею на моих друзьях, и, насколько я помню, она не показалась им столь же привлекательной. Энергетическая щель была, в действительности, эффектом многих частиц, и ее нельзя было интерпретировать буквально, как это делал я. Тем не менее, несмотря на значительный скептицизм, каждый настаивал на том, чтобы я не бросал эту идею и попытался ее осуществить. Тут я сообразил, что не знаю, какова величина щели в тех единицах, которые я понимал — в электрон-вольтах. Этот вопрос был легко решен моим обычным способом: спросить сначала Бина, а затем Харрисона, и когда они «сошлись» на нескольких тысячных электрон-вольта, я был счастлив, так как эта область напряжений не представляет трудностей для измерений.

Я никогда не делал экспериментов, где бы требовалась низкие температуры и жидкий гелий — они казались мне чрезесчур сложными. Однако чем хорошо работать в большой лаборатории, такой, как лаборатория «Дженерал электрик», —

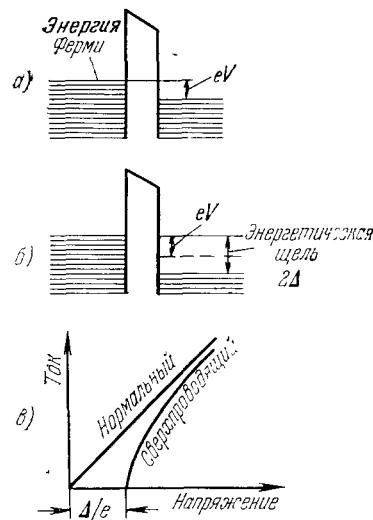


Рис. 5. а) Энергетическая диаграмма двух металлов, разделенных барьером. Энергии Ферми этих двух металлов расположены на различном уровне, вследствие приложенной между металлами разности потенциалов. Туннелировать, слева направо, могут лишь электроны, находящиеся в интервале энергий порядка электрон-вольт, поскольку лишь эти электроны встречают незаполненные энергетические состояния. Принцип Паули разрешает находиться лишь одному электрону в каждом квантовом состоянии. б) Металл справа теперь является сверхпроводящим, и в электронном спектре имеется щель  $\Delta$ . Ни один из электронов сверхпроводника не может иметь энергию такую, чтобы она оказалась лежащей внутри щели. Электроны из металла слева могут все же туннелировать сквозь барьер, однако они не могут войти в металл справа, пока приложенная разность потенциалов меньше  $\Delta/e$ , поскольку они встречают либо заполненное состояние, либо запрещенный энергетический интервал. Если приложенная разность потенциалов превышает  $\Delta/e$ , начинает идти ток. в) Схематическая вольт-амперная характеристика. Когда оба металла находятся в нормальном состоянии, ток прямо пропорционален напряжению. Когда один из металлов — сверхпроводник, вольт-амперная характеристика претерпевает резкое изменение. Точный вид кривой зависит от электронного энергетического спектра сверхпроводника.

так это тем, что вокруг вас всегда имеются люди, которые хорошо осведомлены почти в любой области, и что еще лучше, они охотно приходят к вам на помощь. В моем случае все, что я должен был сделать, это пойти в конец здания, где Уоррен де Сорбо уже экспериментировал со сверхпроводниками. Теперь уже не помню, сколько времени заняла у меня установка дьюаров, которые я позаимствовал, но, вероятно, не более одного-двух дней. Те, кто не знаком с работой при низких температурах, думают, что вся эта область доступна лишь посвященным; в действительности все,

что здесь требуется, это доступ к жидкому гелию, который легко было достать в Лаборатории. Сделав установку (рис. 6), я изготовил свои образцы, используя уже известные слои алюминия и алюминиевого окисла, но сверху наложил не алюминиевые, а свинцовые полоски. Как свинец, так и алюминий являются сверхпроводниками. Свинец становится сверхпроводящим при  $7,2\text{ }^{\circ}\text{K}$ , и для того, чтобы перевести его в сверхпроводящее состояние, достаточно поместить его в жидкий гелий, который кипит при  $4,2\text{ }^{\circ}\text{K}$ . Алюминий становится сверхпроводником только при  $1,2\text{ }^{\circ}\text{K}$ , и, чтобы достичь этой температуры, требуется более сложная установка.

Первые два эксперимента окончились неудачей, так как используемые мной слои окисла оказались чрезвычайно толстыми. Ток через такие слои был слишком слабым, чтобы я мог его надежно измерить теми приборами, которыми я пользовался,— это были просто стандартный вольтметр и стандартный амперметр. Теперь, спустя всего 13 лет, когда наша лаборатория забита тончайшими двухкоординатными самописцами, об этом странно даже подумать. Конечно, и в то время у нас было много осциллографов, но я не очень-то знал, как пользоваться ими. При третьей попытке, вместо того, чтобы специально окислять первую алюминиевую полоску, я просто экспонировал ее на воздухе в течение нескольких минут и затем поместил обратно в напылитель, чтобы нанести сверху попечные полоски из свинца. Получившийся таким образом слой окисла имел толщину порядка  $30\text{ \AA}$ , и я легко мог померить вольт-амперную характеристику имевшими в моем распоряжении приборами. Для меня самый волнующий момент в любом эксперименте наступает как раз перед тем, как я узнаю, является ли определенная идея правильной или нет. Таким образом, даже неудача волнует, и должен сознаться, что большинство моих идей были, конечно, неправильными. Но на этот раз идея работала! Вольт-амперная характеристика заметно изменялась, когда свинец переходил из нормального состояния в сверхпроводящее. Изменение было как раз такого типа, какой изображен на рис. 7. Это было потрясающее! Я немедленно повторил опыт с другим образцом — тот же результат! Еще один образец — и опять тот же результат! Все говорило о том, что я прав! Но как убедиться окончательно? Было хорошо известно, что сверхпроводимость разрушается магнитным полем, однако моя простая установка

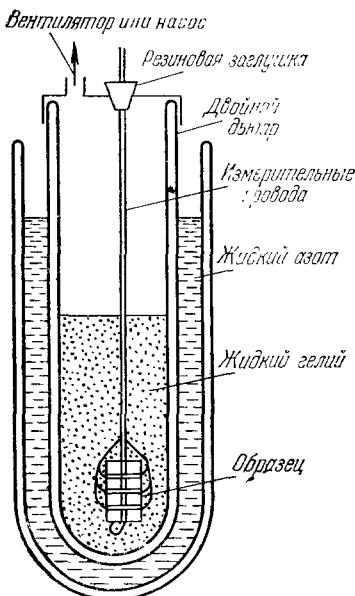


Рис. 6. Обычное экспериментальное устройство, используемое в опытах с низкими температурами.

Оно состоит из двух сосудов Дьюара, внешнего, заполненного жидким азотом, и внутреннего, заполненного жидким гелием. Гелий кипит при  $4,2\text{ }^{\circ}\text{K}$  при атмосферном давлении. Температура может быть понижена примерно на  $1\text{ }^{\circ}\text{K}$  путем уменьшения давления. Образец висит в жидким гелием на измерительных проводах.

речные полоски из свинца. Получившийся таким образом слой окисла имел толщину порядка  $30\text{ \AA}$ , и я легко мог померить вольт-амперную характеристику имевшими в моем распоряжении приборами. Для меня самый волнующий момент в любом эксперименте наступает как раз перед тем, как я узнаю, является ли определенная идея правильной или нет. Таким образом, даже неудача волнует, и должен сознаться, что большинство моих идей были, конечно, неправильными. Но на этот раз идея работала! Вольт-амперная характеристика заметно изменялась, когда свинец переходил из нормального состояния в сверхпроводящее. Изменение было как раз такого типа, какой изображен на рис. 7. Это было потрясающее! Я немедленно повторил опыт с другим образцом — тот же результат! Еще один образец — и опять тот же результат! Все говорило о том, что я прав! Но как убедиться окончательно? Было хорошо известно, что сверхпроводимость разрушается магнитным полем, однако моя простая установка

не позволяла произвести этот эксперимент. На этот раз я должен был пройти через все здание, туда, где Израэль Жакобс изучал магнетизм при низких температурах. Опять меня ждала удача, я сразу заполучил экспериментальную установку, в которой можно было регулировать как температуру, так и магнитное поле, и смог быстро выполнить все необходимые эксперименты. Основные результаты приведены на рис. 8. Они оказались в полном согласии с тем, что можно было ожидать, и, насколько я помню, вся наша группа была очень возбуждена. Мне помнится,

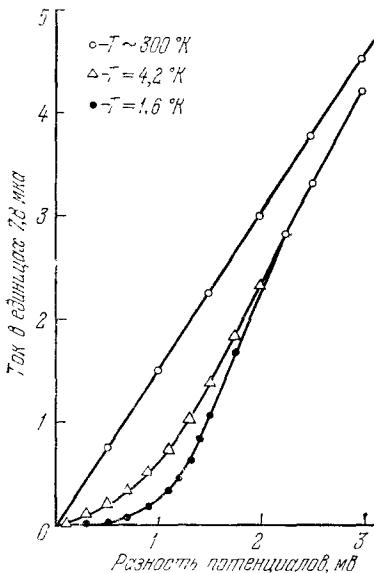


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода алюминий—окисел алюминия—свинец.

Как только свинец становится сверхпроводящим, ток перестает быть пропорциональным напряжению. Большая разница между кривыми при 4,2 и 1,6 °К объясняется изменением энергетической щели с температурой. Некоторый ток течет также и при напряжениях, меньших  $\Delta/e$ ; он обусловлен термически возбужденными электронами в проводниках.

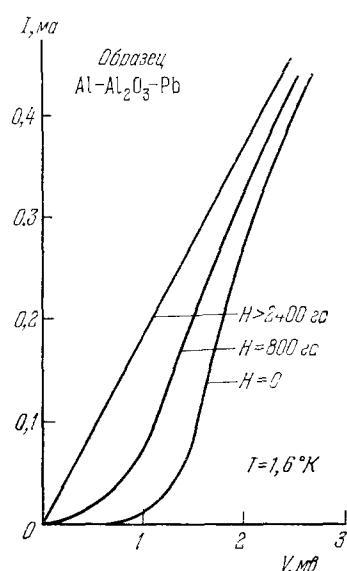


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики при 1,6 °К как функция приложенного магнитного поля.

В поле  $H = 2400 \text{ Гц}$  пленки находятся в нормальном состоянии, в поле  $H = 0$  свинцовая пленка сверхпроводит. Различие характеристик в полях  $H = 0$  и  $H = 800 \text{ Гц}$  объясняется тем, что в тонких пленках энергетическая щель зависит от магнитного поля.

в частности, как Бин с энтузиазмом распространял эту новость по всей Лаборатории, и заодно терпеливо объяснял мне все значение этого эксперимента.

Я, конечно, не был первым, кто измерил энергетическую щель в сверхпроводнике. Вскоре я узнал о прекрасных экспериментах М. Тинкхэма и его учеников, изучавших поглощение инфракрасного излучения. Помню, меня беспокоил тот факт, что величина щели, которую измерил я, не совсем согласовалась с этими, более ранними, измерениями. Бин успокоил меня, сказав, что отныне другие люди должны будут беспокоиться о том, чтобы их измерения согласовались с моими, что мой эксперимент станет эталоном,— я был польщен и впервые почувствовал себя физиком.

Это было самое волнующее время в моей жизни. У нас было несколько замечательных идей, как улучшить этот эксперимент и распространить его на всевозможные материалы, такие, как нормальные металлы, магнитные вещества, полупроводники. Большинство наших идей работало



Рис. 9. Неофициальное обсуждение за чашкой кофе. Слева направо: И. Гиавер, У. Харрисон, Ч. Бин и Дж. Фишер.

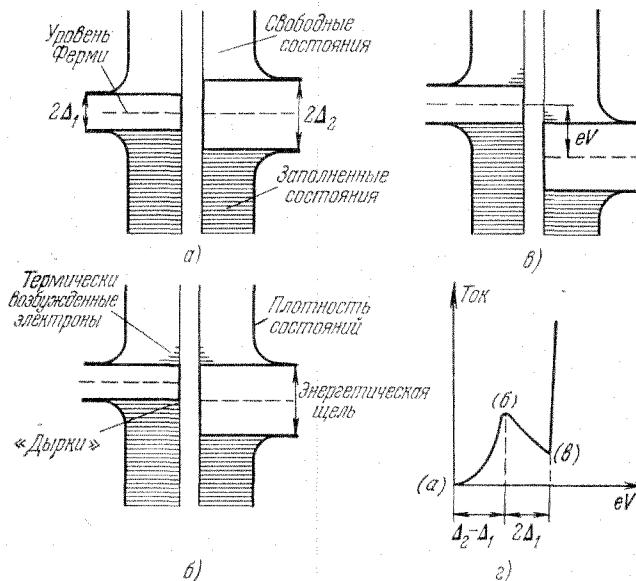


Рис. 10. Туннелирование между двумя сверхпроводниками, обладающими различными энергетическими щелями при температуре выше  $0^{\circ}\text{K}$ .

а) Между сверхпроводниками не приложена разность потенциалов. б) По мере увеличения приложенного напряжения все большее и большее число термически возбужденных электронов приобретают достаточную энергию и могут переходить из сверхпроводника с меньшей щелью в сверхпроводник с большей щелью. При напряжении, изображенном на рисунке, все возбужденные электроны могут найти свободное состояние справа. в) При еще большем напряжении число свободных состояний справа падает, то электрический ток будет убывать с ростом напряжения. При достаточно большом напряжении электроны с энергиями, лежащими ниже щели в сверхпроводнике слева, окажутся напротив свободных состояний справа, и произойдет быстрый рост тока. г) Схематическая картина ожидаемой вольт-амперной характеристики.

не очень хорошо, и Харрисон вскоре опубликовал теорию, из которой следовало, что реальная действительность в конце концов — весьма сложная штука. Однако что касается эксперимента со сверхпроводниками, то он всегда чудесным образом получался и ни разу нас не подвел. Было похоже, что вероятность туннелирования была прямо пропорциональна плотности электронных состояний в сверхпроводнике. Но если это действительно так, не требовалось много воображения, чтобы понять, что туннелирование между двумя разными сверхпроводниками должно приводить к вольт-амперной характеристике с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 10). А отрицательное сопротивление означало, конечно, — усилители, излучатели и другие полезные вещи. Однако ни у кого из окружающих меня людей не было аппаратуры, которая позволила бы с помощью откачки понизить температуру гелия настолько, чтобы алюминий стал сверхпроводящим. На этот раз я должен был перейти в соседнее здание и восстановить старую установку для получения низких температур. И действительно, как только алюминий стал сверхпроводящим, появилось отрицательное сопротивление; тем самым правильность идеи о том, что вероятность туннелирования прямо пропорциональна плотности энергетических состояний, была доказана экспериментально. Типичная вольт-амперная характеристика изображена на рис. 11.

Теперь дела выглядели прекрасно, поскольку, как я уже говорил, используя этот эффект, можно было изготовить электронные устройства. Правда, такие устройства могли бы работать только при низких температурах. Нужно помнить, что в 1960 г. полупроводниковая электроника не была столь развита, как теперь. Мы думали, например, что сверхпроводящий контакт будет иметь хорошие шансы в соревновании с диодом Эсаки. И здесь передо мной встало проблема выбора: чему посвятить себя в дальнейшем — науке или технике? Я решил, что сначала должен заняться наукой, и получил полную поддержку от моего непосредственного начальника Роланда Шмитта.

Теперь-то я понимаю, сколь соблазнительно было бы для Шмитта привлечь других людей для работы в этой новой области. Да и окружающие меня многое более опытные физики могли бы сделать то же самое. Вместо этого Шмитт дал мне помощника Карла Мегерле, который пришел в нашу Лабораторию в качестве стажера-исследователя. Мы хорошо сработались и вскоре опубликовали статью, в которой было описано большинство основных эффектов.

В физике, как правило, важно провести эксперименты в экстремальных условиях: при более высоких энергиях, при больших магнитных полях, или, как в нашем случае, при более низких температурах. Поэтому мы объединили наши усилия с Говардом Хартом, который только что закончил монтаж холодильной установки на гелии-3, позволяющей получать температуры вплоть до  $0,3^{\circ}\text{K}$ . В это же время Мегерле собрал синхронный усилитель, который позволял непосредственно измерять производную тока по напряжению. Эта была действительно красивая машина, где опорный сигнал снимался с катушки, вокруг которой вращался магнит со скоростью 8 об/сек. Конечно, она сильно уступала современным синхронным усилителям. Мы уже до этого знали, что в вольт-амперной ха-

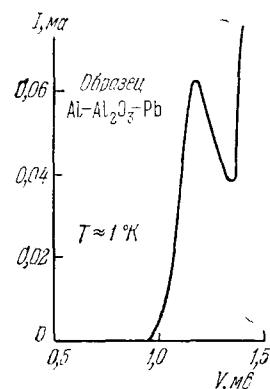


Рис. 11. Экспериментальная характеристика с отрицательным сопротивлением, полученная при туннелировании между двумя различными сверхпроводниками.

теристике свинца имеются аномалии, которых не должно было быть согласно простой теории БКШ. Теперь мы окончательно выявили их, обнаружив несколько дополнительных изгибов на кривой производной по току (рис. 12). Мы были счастливы, потому что все, что давали до сих пор туннельные эксперименты, полностью подтверждало теорию БКШ, а это совсем не то, что хотелось бы экспериментатору. Всякий экспериментатор мечтает показать, что общепризнанная теория является неправильной, и в данном случае мы попали-таки в слабое место теории. Тогда же мы

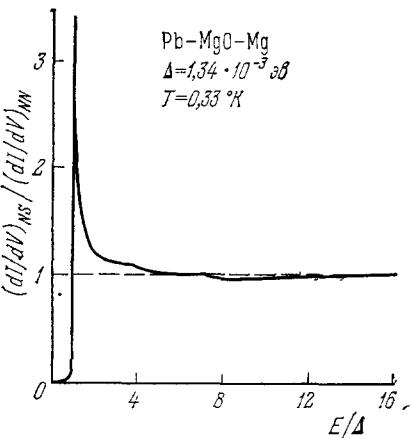


Рис. 12. Нормированная производная от тока по напряжению для свинцово-контакта в образце свинец—окись магния — магний при  $0,33^{\circ}\text{K}$ . Простая теория БКШ предсказывает, что производная должна монотонно приближаться к единице по мере роста энергии. Вместо этого в интервале между  $4\Delta$  и  $8\Delta$  наблюдено несколько изгибов кривой. Эти особенности связаны с фононным спектром в свинце.

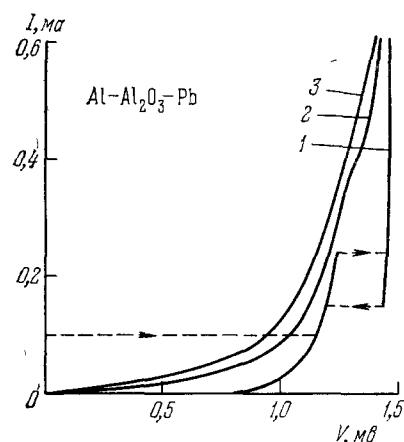


Рис. 13. Влияние захваченного магнитного потока на туннельные характеристики.

1 — первоначальная кривая; 2 — при удалении внешнего магнитного поля; 3 — в случае наложения умеренного магнитного поля. На кривой 1 виден также небольшой ток, отвечающий нулевому сопротивлению. Первоначально мы интерпретировали этот ток как результат наличия металлических закороток, хотя теперь ясно, что в действительности он обязан эффекту Джозефсона.

высказали предположение, что эти изгибы как-то связаны с тем фононами, которые, как считалось, вызывают притяжение между электронами в сверхпроводнике. Однако, как это часто случается, теоретики обернули наши результаты против нас. Они ловко использовали наличие изгибов на кривых, соответствующим образом обобщили теорию и доказали, что теория БКШ в действительности является правильной. Профессор Бардин сделал подробный отчет по этому поводу в своей недавней Нобелевской лекции.

Тем временем я закончил обучение в РПИ и, поскольку туннелирование в сверхпроводниках в основной своей части было понято, я решил писать диссертацию по теории сплавов, испытывающих фазовый переход типа «порядок-беспорядок», под руководством проф. Хантингтона. Затем кто-то познакомил меня с короткой заметкой Б. Джозефсона в журнале «Физикс Леггерс» и спросил, что я думаю по этому поводу? Признаюсь, я не понял этой работы, но вскоре мне представился случай встретиться с Джозефсоном в Кембридже, и эта встреча произвела на меня огромное впечатление. Один из эффектов, предсказанных Джозефсоном, состоял в том, что через барьер из окисла может проходить сверхпроводящий ток без падения напряжения, если металлы по обе стороны от барьера являются сверхпроводящими; это так называемый стационарный эффект Джозефсона.

Мы наблюдали этот эффект много раз; и действительно, невозможно не видеть этот ток, если работать с контактами олово — окисел олова — олово или свинец — окисел свинца — свинец. Первые туннельные контакты делались с алюминиевыми окислами, которые обычно толще, и поэтому термические флуктуации подавляли постоянный сверхпроводящий ток. В нашей первой работе мы с Мегерле привели график кривой (рис. 13), которая ясно указывала на наличие такого сверхпроводящего тока и на его сильную зависимость от магнитного поля. Однако у меня уже было готовое объяснение этого явления — сверхпроводящий ток шел через контакт по металлической закоротке или мостику. Правда, я был озадачен неожиданной чувствительностью этого тока к магнитному полю, однако никто не знал, как поведет себя в этой ситуации мостик длиной и шириной 20 Å. Если я что-нибудь и усвоил как ученый, так это то, что не надо усложнять вещи там, где можно дать простое объяснение. Таким образом, все образцы, которые показывали эффект Джозефсона, мы отбрасывали как имевшие закоротки. На этот раз я оказался слишком простодушен! С тех пор меня часто спрашивали, не ругал ли я себя за то, что проглядел этот эффект. Я твердо отвечаю «нет», так как, чтобы сделать экспериментальное открытие, мало наблюдать какой-то эффект, нужно также понимать смысл и значение этого наблюдения, а в данном случае я и близко не подошел к этому. Даже после того, как я узнал о стационарном эффекте Джозефсона, мне казалось, что его нельзя отличить от эффекта закороток, поэтому я ошибочно считал, что только так называемый нестационарный эффект Джозефсона подтвердит или опровергнет теорию Джозефсона.

В заключение я позволю себе выразить надежду, что этот доклад, во многом носящий довольно личный характер, позволит хоть немного проникнуть в природу научного открытия. Сам я считаю, что дорога к научному открытию редко является прямой и что для этого не обязательно быть большим специалистом. Более того, я убежден, что часто новичок в данной области имеет больше шансов, именно потому, что он невежда и не знает всех тех сложных причин, по которым данный эксперимент не следует ставить. Однако важно, чтобы вы могли получить, если это нужно, совет и помочь от специалистов в различных областях науки. Для меня самого важнее всего было то, что я оказался в нужное время в нужном месте и что у меня нашлось много друзей как внутри, так и вне «Дженерал электрик», которые бескорыстно помогали мне.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Tunneling Phenomena in Solids, Ed. E. Burstein and S. Lundqvist, N. Y., Plenum Press, 1969; Superconductivity, Ed. R. D. Parks, N.Y., Dekker, 1969.